

# INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



*This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:*

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

*This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.*

# Remblais sur sols mous améliorés par inclusions verticales rigides

## Embankments on soft soils, improved by vertical rigid inclusions

O.COMBARIEU, Directeur Adjoint, Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées, Rouen, France

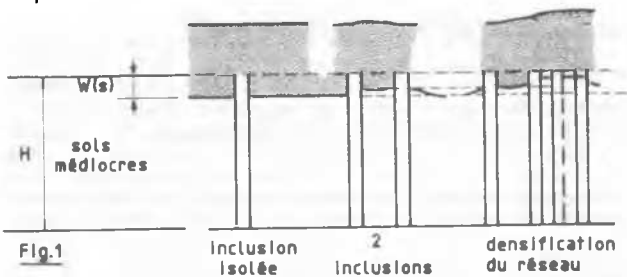
**RESUME** Il est présenté une méthode de dimensionnement d'un réseau d'inclusions verticales rigides, destiné à améliorer un sol compressible supportant un remblai d'apport. La méthode fait appel à deux phénomènes, celui d'effet de voûte dans le remblai, et celui de frottement négatif dans les sols mous, créés par interaction entre les éléments rigides et le milieu ambiant déformable. On montre ainsi que l'on peut calculer le tassement d'ensemble du remblai et l'effort transmis aux inclusions dont le dimensionnement peut être optimisé.

### INTRODUCTION

L'éventail des méthodes d'amélioration des sols de fondation est, à l'heure actuelle, très large. Ces techniques ont fait l'objet d'une publication [QUEROY et al, 1985] précisant les procédés, leurs performances et limites d'emploi. Un procédé ancien très largement millénaire est la consolidation par "pilotis", de technique empirique, qui fait actuellement une réapparition timide. L'étude qui suit optimise le dimensionnement d'un réseau d'inclusions, destiné à améliorer un sol mou supportant un remblai.

### PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN RESEAU

Un réseau n'est efficace, que si les têtes des inclusions sont pratiquement fixes par rapport au sol environnant ; les pointes des inclusions reposeront donc sur un horizon de sol, suffisamment résistant ; dans le cas contraire l'efficacité est très faible. Le schéma 1, montre le principe du fonctionnement, qui consiste à réduire le tassement du remblai par augmentation du nombre des inclusions, chaque inclusion supportant une fraction du poids des remblais.



### METHODE DE CALCUL DU RESEAU

La figure 2, représente un réseau d'inclusions de diamètre 2R, espacées de 2b ; le remblai (r), a une épaisseur  $h_r$ , une masse volumique  $\gamma_r$ , et un angle de frottement  $\phi_r$  ; le sol compressible a une épaisseur H. A l'équilibre, en fin de consolidation des sols mous, chaque inclusion est soumise aux efforts suivants :

- en tête : Q, charge transmise par le remblai
- sur une hauteur  $h_c < H$  :  $F_n$ , frottement négatif
- sur la hauteur  $H - h_c$  :  $F_p$ , frottement positif
- en pointe :  $Q_p$

$$\text{avec l'égalité } Q + F_n = F_p + Q_p \quad \dots (1)$$

Le sol compressible est lui, à l'équilibre, soumis en surface, à une contrainte résiduelle  $q'(h_r) < \gamma_r h_r$ , qui régit le comportement du remblai, et l'intensité du frottement négatif  $F_n$ . La méthode proposée permet le calcul de  $q'(h_r)$ , Q,  $F_n$ .

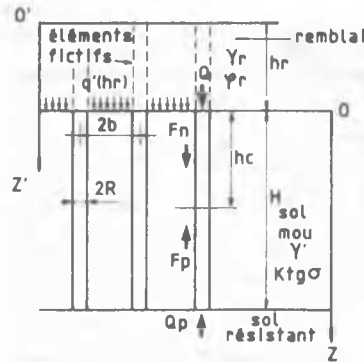


Fig.2

Pour calculer  $q'(h_r)$ , on fait l'hypothèse que l'effet de groupe des têtes d'inclusions est équivalent à l'effet de groupe d'éléments fictifs de même section droite que les inclusions et surchargés sur la hauteur  $h_r$  par frottement négatif (fig. 2). On se reportera aux études de COMBARIEU [1985, 1987] pour le détail de la méthode exposée.

$$\text{On montre que } q'(h_r) = \frac{\gamma_r}{m_r} (1 - e^{-m_r h_r})$$

où  $m_r = m_r(d, \frac{b}{R})$ , est fonction de  $\frac{b}{R}$ , espacement relatif des

inclusions et de  $\lambda$ , coefficient d'accrochage du sol le long du fût, lui-même fonction de  $Kt\phi_r$  caractérisant le contact sol-fût (ici sol-sol). Généralement, dans un remblai de bonne qualité,  $\lambda = 0$ , et alors  $m(d, \frac{b}{R})$  se réduit à  $\frac{2R Kt\phi_r}{b^2 - R^2}$

L'effort en tête d'une inclusion vaut

$$Q = \pi b^2 \gamma_r h_r - \pi (b^2 - R^2) q'(h_r) \quad \dots (2)$$

que l'on cherche à rendre le plus fort possible. En pratique, on se fixe comme objectif de ramener la contrainte  $\gamma_r h_r$  à une valeur  $q'(h_r) = \alpha \gamma_r h_r$  après renforcement ( $\alpha < 1$ ) ; le diamètre 2R étant fixé, on en déduira le maillage b/R.

On montre ainsi que si  $\varphi_r$  croît, l'effet de voûte croît, et si  $\alpha$  décroît, le maillage se resserre. Un ordre de grandeur courant choisi pour  $\alpha$  est 0,2 à 0,3.

Le rôle bénéfique des inclusions ne s'arrête pas à ce simple transfert d'effort en tête. Le sol médiocre, soumis à  $q'(h_r)$  va en effet surcharger les fûts d'inclusions par frottement négatif, lequel par effet de groupe va décharger le sol médiocre en profondeur.

Au niveau  $z$  en fin de consolidation du sol, on montre que la contrainte moyenne effective  $\bar{q}(z)$ , intéressant la surface d'influence  $\pi(b \cdot R')$  de l'inclusion est une fonction simple de

$$q(z, R), \text{ contrainte verticale le long de l'inclusion,}$$

$$\bar{q}(z) = Aq(z, R) + Bz + C \quad \dots (3)$$

$q(z, R)$  est donné par la théorie du frottement négatif, tenant compte des effets d'accrochage et de groupe, évoqués plus haut

$$q(z, R) = \frac{\gamma' h_c}{m_2(h, b/R)} + e^{-m_2 z} \left[ q'(h_r) - \frac{\gamma' h_c}{m_2(h, b/R)} \right]$$

Le frottement négatif  $F_m$  agit sur une hauteur  $h_c$  définie par  $q(h_c, R) = \gamma' h_c$ , la valeur de  $h_c$  pouvant excéder  $H$ , épaisseur des sols compressibles.

On aura  $F_m = \frac{2 \cdot R \cdot K \cdot b \cdot \delta}{m_4} q'(h_r)$  si  $h_c < H \dots (4)$

ou  $F_m = \frac{2 \cdot R \cdot K \cdot b \cdot \delta}{m_4} (\gamma' H + q'(h_r) - q(H, R))$  si  $h_c > H \dots (4)$

Globalement chaque inclusion sera dimensionnée pour reprendre l'effort  $Q + F_m$ , chacun des deux termes étant calculé par (2) et (4). On cherchera donc une dimension économique des inclusions, ce qui peut amener à choisir un diamètre  $2R'$ , de la partie courante largement inférieure à  $2R$ , ce qui amène à la géométrie schématisée fig. 3.

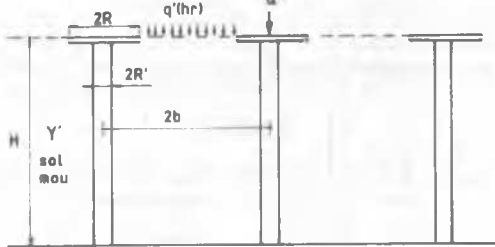


Fig.3

On tient compte de cette adaptation dans le calcul de  $F_m$ . Les termes  $F_m$  et  $Q_p$  de (1) conduisent au dimensionnement final des inclusions.

**TASSEMENT DU REMBLAI**

Le sol compressible est soumis à la contrainte effective globale  $\bar{q}(z)$  donnée en (3) avec  $\bar{q}(0) = q'(h_r)$  qui permet le calcul du tassement sur toute la hauteur  $h_c$ , puis  $H - h_c$ .

**DONNEES EXPERIMENTALES**

La littérature technique a exposé plusieurs résultats expérimentaux, qui ont permis de les confronter avec la méthode brièvement exposée ici. On citera en particulier ceux de KORFIATIS [1984], qui a comparé avec un remblai témoin le comportement de deux remblais sur réseaux d'inclusions de maillages différents; la réduction des tassements, importante est confirmée par les calculs.

En Ecosse [REID et al, 1983], de nombreux remblais d'accès à des ouvrages d'art, sur sols compressibles, ont été construits sur réseaux de pieux surmontés de petites semelles; une instrumentation a permis de suivre les tassements, les pressions interstitielles, la charge en tête des inclusions et les déplacements horizontaux, à la fois dans la zone améliorée et hors de celle-ci.

Il a été montré que 80% de la charge des remblais passe dans les inclusions, les déplacements horizontaux des sols mous étant pratiquement éliminés. Les calculs ont montré une parfaite concordance avec les charges mesurées en tête d'inclusions.

Enfin, sur l'abaque expérimentale de dimensionnement des réseaux utilisés en Suède [BROMS, 1979] (fig. 4), on a reporté les courbes théoriques correspondant à diverses valeurs de  $K/q$ , qui donnent le maillage du réseau en fonction de la hauteur du remblai, nécessaire pour reprendre 80% du poids de ce dernier.

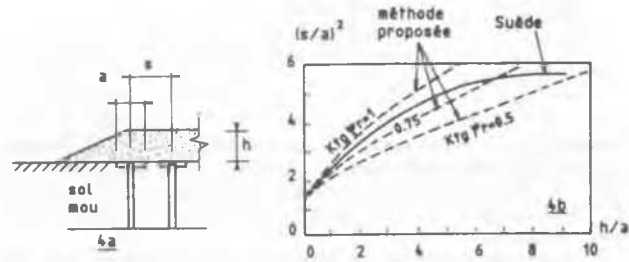


Fig.4 - Abaque de dimensionnement des réseaux de pieux d'après Bross

**CONCLUSION**

La construction des remblais sur sols compressibles conduit très souvent à une surconsommation importante de matériau par suite des tassements dont les sols médiocres sont le siège. Des problèmes de délais d'exécution s'ajoutent généralement aux précédents, liés à la stabilité.

Une méthode d'amélioration consiste à renforcer ces sols par des inclusions verticales rigides. Une méthode de dimensionnement de ces réseaux a été brièvement exposée.

Comme le montre l'expérience accumulée à l'étranger, le renforcement par pieux des sols compressibles sous remblai permet :

- de diminuer les tassements dans des proportions considérables,
- de construire immédiatement les remblais,
- de limiter les mouvements latéraux,
- d'assurer la stabilité à court terme.

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

BROMS B. (1979). Problems and solutions to construction in soft clay. Proceedings 6<sup>th</sup> Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Singapore, vol 2, pages 28 à 30.

COMBARIEU O. (1985). Frottement négatif sur les pieux. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, rapport de recherche LPC, n° 136, 152 pages.

COMBARIEU O. (1987). Amélioration des sols par inclusions rigides verticales. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Rapport des Laboratoires GT 26, 43 pages.

KORFIATIS G.P. (1984). Field testing of short piles systems for floor support. Colloque International "renforcement en place des sols et des roches". Paris, presse de l'ENPC pages 71 à 75.

QUEROY D., CHAPUT D., PILOT G. (1985). Amélioration des sols de fondation. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, note d'information technique 55 pages.

REID W.M.; BUCHANAN N.W. (1983). Bridge approach support piling. In "Piling and ground treatment", Institution of civil Engineers, London, pages 267 à 274.